

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ВИДА ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В ЯДРЕ АЛГОРИТМА СЖАТИЯ**

In this article we research the impact of wavelet function types on output data of compression of still images. This research is made with a purpose of determining optimal correspondences, encapsulated in spectrum class of images, between input parameters of compression and wavelet bases.

Сжатие видеoinформации [1,2] широко применяется в таких областях знаний, как картография, разведка полезных ископаемых, биология, медицина, криминалистика, и других, где существует необходимость хранения огромного количества изображений. Существует множество математических подходов к решению задачи сжатия изображений, среди них использование рядов Фурье, фракталов и вейвлетов как математической основы алгоритмов сжатия. Применение вейвлетов в качестве математического базиса имеет явные преимущества в представлении локальных особенностей изображений по сравнению с рядами Фурье и требует значительно меньших вычислительных затрат, чем использование фрактальных принципов (принципов подобия) в архивации статических изображений. Множество вейвлет-базисов и фактическое отсутствие ограничения на поиск наиболее подходящего способа сжатия изображений обуславливают возможность создания его максимально гибкого адаптивного алгоритма, структура которого была разработана и описана в работе [3]. Адаптивность алгоритма обеспечивается интеллектуальным блоком автоматической спектральной классификации изображений [4], благодаря чему производится определение их спектральных характеристик. По полученному спектральному классу изображения, заданному проценту сохранения информации и схеме субдискретизации можно определить оптимальный способ сжатия статического изображения.

В данной работе исследуется эффективность применения различных множеств вейвлет-базисов в качестве математической основы сжатия статических изображений, а также обосновывается оптимальный вейвлет-базис с учетом заданных ис-

ходных условий: спектрального класса изображения, схемы субдискретизации, процента сохранения информации. Соответствие вейвлет-базисов определенным значениям исходных условий будет положено в основу адаптации алгоритма сжатия статических изображений. Данное соответствие можно представить в виде древовидной структуры (рис. 1).

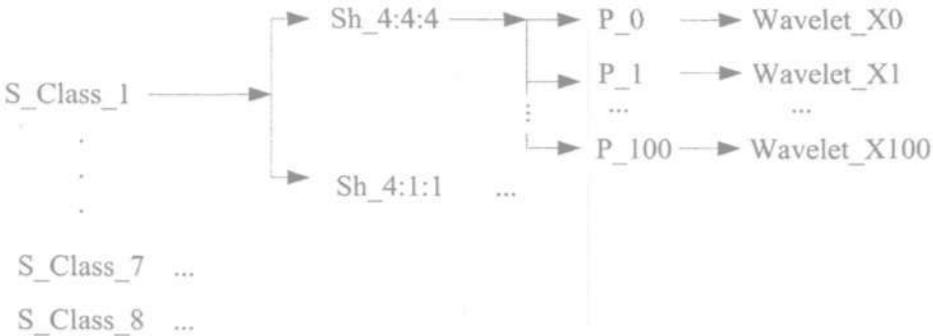


Рис. 1. Древовидное представление соответствия вейвлет-базиса заданным исходным условиям адаптивного вейвлет-базисного сжатия статических изображений (S\_Class\_N – класс изображения; Sh – схема субдискретизации; P\_0 – процент сохранения информации; Wavelet\_X0 – вейвлет-функция)

Основными критериями оптимизации сжатия являлись минимизация флуктуации при обработке изображений, а также минимизация тренда в результате сжатия в рамках одного спектрального класса. Оптимальными принимаются вейвлет-функции, которые вносят предсказуемые искажения в цветовую, яркостную и контрастную области изображения, а также обеспечивают стабильные результаты сжатия. Были рассмотрены следующие типы вейвлетов: вейвлеты Добеши, вейвлет Хаара (как частный случай вейвлета Добеши), койфлеты, симлеты, ортогональные и биортогональные вейвлеты. Установлено, что ортогональные и биортогональные вейвлеты не могут использоваться в адаптивном алгоритме сжатия изображений в силу высокого тренда выходных параметров сжатия (размер файла, реальный процент сохранения информации) при одинаковых исходных условиях. Для различных исходных условий сжатия поиск оптимальных вейвлетов осуществлялся из перечня: вейвлеты Добеши, вейвлет Хаара, койфлеты и симлеты.

Количество коэффициентов, описывающих вейвлет-функцию, также является критическим параметром при сжатии статических изображений. Анализ вейвлетов высоких порядков показал, что малый порядок ( $10^{-3}$ – $10^{-7}$ ) их крайних коэффициентов не вносит значительного вклада в картину вейвлет-представления изображения, однако сокращает возможное число итераций вейвлет-обработки, что ухудшает концентрацию энергии изображения в малых областях. Следовательно, количество нулевых значений в вейвлет-представлении изображения уменьшается, и это приводит к снижению степени сжатия изображения.

В ходе анализа вейвлет-функций для сжатия статических изображений были выделены следующие вейвлеты:

$$\begin{aligned} & \text{DB01, DB02, ..., DB20,} \\ & \text{CO01, CO02, ..., CO05,} \\ & \text{SY01, SY02, ..., SY20,} \end{aligned} \quad (1)$$

где DB, CO и SY обозначают вейвлеты Добеши, койфлеты и симлеты соответственно, а цифры задают порядок вейвлета.

Эффективность применения используемой вейвлет-функций оценивается по степени сжатия изображений в соответствии с реальным процентом сохранения информации после квантования вейвлет-коэффициентов. Квантование коэффициентов вейвлет-представления изображения позволяет внести в него дополнительные нулевые значения, повысив тем самым степень сжатия изображения в результате применения процедуры вторичного сжатия. Квантование коэффициентов вейвлет-представления изображения ведет к определенным информационным по-

терям, но может использоваться для реализации адаптивного вейвлет-базисного алгоритма сжатия изображений с варьируемым коэффициентом сохранения информации или с варьируемой степенью сжатия. Возникает задача поиска функции, которая позволит найти наиболее близкое соответствие между задаваемым коэффициентом сохранения информации на входе и весами квантования коэффициентов вейвлет-представления изображения вне зависимости от спектрального класса изображения и схемы субдискретизации.

Оценка реального коэффициента сохранения информации, или процента сохранения информации восстановленного после сжатия изображения по отношению к исходному, производится в соответствии с ранее разработанным критерием качества фильтрованных изображений [5]. В нем отсутствуют недостатки критериев, основанных на минимизации среднеквадратичного или максимального отклонения значений интенсивностей пикселей восстановленного и исходного изображения. По этому критерию анализируются отклонения интенсивностей локальных участков пикселей от усредненного максимума отклонений по всему изображению, тем самым достигается более точная и качественная оценка процента сохранения информации восстановленного изображения. Существует также возможность точной настройки данного критерия под конкретную область исследуемых задач благодаря наличию порога чувствительности изменений восстановленного изображения по отношению к исходному. Для настройки критерия на задачу вейвлет-сжатия изображений обработано некоторое их число и установлен порог чувствительности, позволяющий максимально приблизить машинную оценку процента сохранения информации к экспертной, что дает возможность перейти к следующему этапу оптимизации и настройки адаптивного вейвлет-базисного алгоритма сжатия изображений. При поиске оптимальной функции квантования коэффициентов вейвлет-представления изображений установлено, что аргументом этой функции, помимо заданного процента сохранения информации, является также количество вейвлет-коэффициентов, определяющее максимально возможное число итераций вейвлет-преобразования. Коэффициент сохранения информации  $k_s$  при вейвлет-сжатии изображений выражается следующим образом:

$$k_s = 1 + f(\alpha, \beta), \quad (2)$$

где  $\alpha$  зависит от числа коэффициентов, описывающих вейвлет-функцию;  $\beta$  - от заданного процента сохранения информации.

В правой части выражения (2) единица определяет тот факт, что при 100 % коэффициенте сохранения качества изображения второе слагаемое равняется нулю, поскольку в квантовании коэффициентов вейвлет-представления изображений участвует величина, обратная коэффициенту сохранения информации, - коэффициент потери информации при сжатии изображения:

$$k_l = 1 - k_s.$$

Квантование производится по следующему алгоритму:

- определяются максимумы коэффициентов вейвлет-представления изображения отдельно для области коэффициентов, полученных в результате последней итерации, и для области коэффициентов, полученных на предыдущих шагах вейвлет-преобразования изображения;
- найденные максимумы умножаются на коэффициент потери информации. Данные значения далее будут называться множителями квантования. В силу того, что в процессе запоминания вейвлет-коэффициентов представления изображения наибольшие возможности с целью минимизации объема памяти предоставлены в целочисленной области их значений, существует возможность задавать длину типа хранения в битах без учета дробной части, поэтому множители квантования необходимо уменьшить в  $n$  раз ( $n$  - изначально заданный коэффициент). Округление позволяет увеличить количество нулевых коэффициентов и сократить число возможных степеней свободы значений коэффициентов. Число и устанавливается экспертным путем. Наибольшее количество информации сконцентрировано в ко-

эффицентах вейвлет-представления изображения, которые получены в результате последней итерации. Эти коэффициенты необходимо сохранить в максимально возможном количестве, а значит, следует определить два числа уменьшения множителя квантования  $n_1$  и  $n_2$  для множителя квантования наиболее информативной части коэффициентов и остальной их части соответственно. В результате исследования выборки изображений установлено, что оптимальными значениями уменьшения множителей квантования являются:  $n_1 = 100$  и  $n_2 = 10$ . Следовательно, при квантовании поля коэффициентов вейвлет-представления изображения с максимальным уровнем потерь информации в наиболее информативной области сохранятся только те коэффициенты, которые превышают величину, равную 1 % от их максимума в данной области, а в остальной области коэффициентов сохранятся только те из них, которые превышают величину, равную 10 % от своего максимума. Такое уменьшение устанавливает оптимальное соотношение между близостью реального значения процента сохранения информации к изначально заданному и наименьшим размером файла при заданных исходных условиях:

- для коэффициентов вейвлет-представления изображения, найденных на последней итерации и на предыдущих итерациях вейвлет-преобразования, производится раздельное квантование на соответствующий множитель. В результате получается прореженное поле коэффициентов, т. е. данная процедура вносит дополнительное количество нулевых коэффициентов, что, в свою очередь, уменьшает размер файла сжатого изображения;

- при сохранении полученного поля коэффициентов вейвлет-представления изображения производится операция вторичного сжатия по известному алгоритму (Хаффмана, LZW, арифметического сжатия и др.).

Для исследования зависимости параметров сжатия изображений от вида вейвлет-функции необходимо определить функцию  $f(\alpha, \beta)$  в коэффициенте сохранения информации (2). Очевидно, что данная функция должна равняться 0 при заданном 100 % уровне сохранения информации, и -1 при 0 % уровне сохранения информации. Исследования показали, что функция имеет нелинейный характер: в области, близкой к 100 % сохранения информации, ее крутизна незначительна по сравнению с крутизной в области, близкой к 0 %. К экспериментально полученной зависимости  $f(\alpha, \beta)$  от числа коэффициентов представления вейвлет-функции и заданного процента сохранения информации приближается аппроксимирующая функция вида

$$f(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \frac{N}{N_{\text{макс}}} \left( \sin \left( \frac{\pi}{2} \frac{x}{100} \right) - \left( 2 - \frac{x}{100} \right) \right),$$

где  $N_{\text{макс}}$  - максимальное число вейвлет-коэффициентов, описывающих вейвлет-функции, используемые при адаптивном сжатии изображений (в данном случае  $N_{\text{макс}} = 40$  для вейвлетов DB20 и SY20);  $N$  - число вейвлет-коэффициентов, описывающих вейвлет-функцию, непосредственно применяемую при сжатии изображения;  $x$  - заданный процент сохранения информации. На рис. 2 приведены графики функции  $k_x = 1 + f(\alpha, \beta)$  и ее аппроксимирующей функции при  $N = N_{\text{макс}}$ , т. е. при сжатии с использованием вейвлет-функции DB20 или SY20.

Полученные зависимости коэффициента сохранения информации от вида вейвлет-функции и заданного процента сохранения информации позволяют проанализировать влияние вейвлет-базисов на выходные параметры сжатия изображений. С этой целью был отобран ряд растровых изображений различных спектральных классов в равных количествах.

Для каждого изображения из выделенного множества согласно приведенной схеме (см. рис. 1) были найдены зависимости между спектральным классом исследуемого изображения, схемой субдискретизации и процентом сохранения информации. Задаваемый уровень сохранения информации уменьшался со 100 до 0 % с

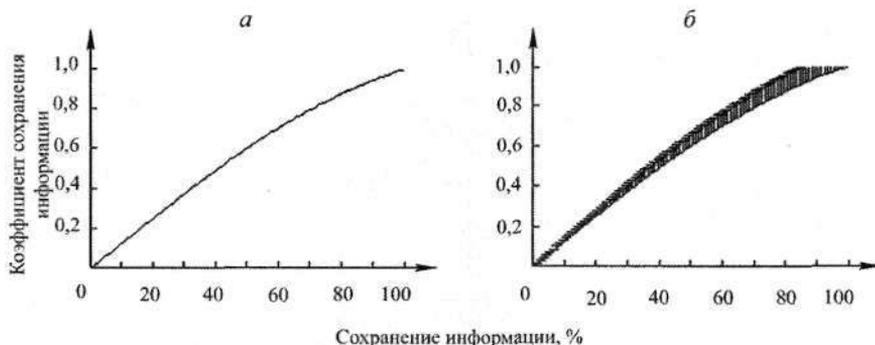


Рис. 2. Графическое представление коэффициента сохранения информации  $k_i$ : *a* – экспериментально полученная зависимость; *б* – аппроксимирующая функция

шагом 1 %, исследование проводилось с использованием 45 вейвлетов (1). Для каждого изображения получено 9090 выходных значений, характеризующих размер сжатого изображения (степень сжатия) и реальный процент сохранения информации. Данные о выходных параметрах сжатия группировались по спектральным классам изображений с целью консолидированного анализа и поиска оптимальных параметров сжатия для всех возможных сочетаний схемы субдискретизации и заданного процента сохранения информации в рамках спектрального класса.

Поиск оптимального вейвлет-базиса при заданных исходных условиях проводился по следующей схеме: в рамках одного спектрального класса для каждого изображения, заданной схемы субдискретизации и процента сохранения информации определялся вейвлет-базис, который позволял получить максимальную степень сжатия и значение реального процента сохранения информации в диапазоне  $\pm 10\%$  от заданного значения. Актив данного вейвлет-базиса при заданных исходных условиях увеличивался на 1. Оптимальным являлся тот вейвлет-базис, актив которого оказался наибольшим. В ходе анализа в каждом спектральном классе изображений определены 202 варианта сжатия изображения в зависимости от входных параметров. На рис. 3 приведен пример оптимальных вейвлет-базисов для изображений первого спектрального класса [4], схемы субдискретизации 4:4:4 и диапазона сохранения информации от 60 до 100 % с шагом 10 %.

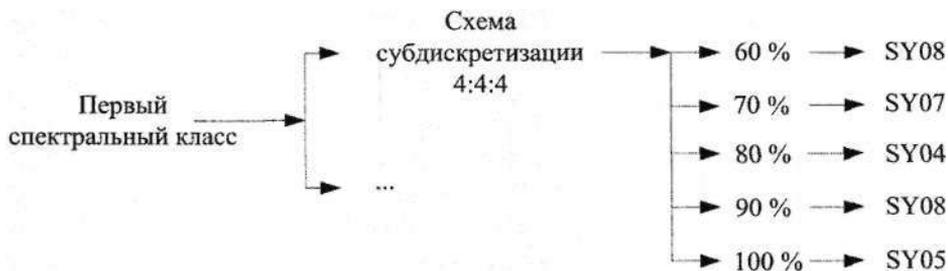


Рис. 3. Дерево соответствия оптимальных вейвлет-функций, используемых при сжатии изображений первого спектрального класса, и заданных исходных условий

Анализ зависимости параметров сжатия изображений от вида вейвлет-функции, используемой в ядре алгоритма сжатия, позволил получить исчерпывающую информацию о влиянии вейвлет-базиса на степень сжатия изображений, его качество после процедуры квантования поля вейвлет-коэффициентов и вторичного сжатия. Инкапсулированная рамками спектрального класса обработка данных, полученных при помощи консолидированного анализа выходных параметров вейвлет-базисного алгоритма сжатия изображений, выявила оптимальные вейвлет-функции для каждой конкретной пары (схемы субдискретизации и заданного процента сохранения информации) исходных условий каждого спектрального класса.

На базе алгоритма спектральной классификации статических изображений, функциональной зависимости коэффициента сохранения информации (2), данных

об оптимальном вейвлет-базисе для определенных исходных условий, алгоритма квантования и алгоритма вторичного сжатия стало возможным построение адаптивного вейвлет-базисного алгоритма сжатия растровых изображений.

1. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М., 2004.

2. Ватолин Д., Ратушняк Б., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М., 2004.

3. Тихоненко С.Г., Садов В.С. // Изв. Бел. инж. акад. 2005. № 1 (19)/2. С. 155.

4. Чернявский А.Ф., Тихоненко С.Г., Садов В.С. // Информатика. 2005. № 3 (7). С. 52.

5. Тихоненко С.Г. // Труды Девятой республиканской научной конференции студентов и аспирантов «НИРС-2004», Гродно, 27-28 мая 2004 г.: в 6 ч. Гродно, 2004. Ч. 6. С. 241.

Поступила в редакцию 26.02.07.

*Василий Сергеевич Садов* - кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных систем.

*Сергей Геннадьевич Тихоненко* - аспирант кафедры интеллектуальных систем. Научный руководитель - В.С. Садов.

*Александр Федорович Чернявский* - доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси, директор НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.